

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

ГРНТИ 68.05.00; 68.05.45

DOI: [10.51886/1999-740X.2023.2.91](https://doi.org/10.51886/1999-740X.2023.2.91)А.А. Курманбаев^{1*}, Т.Р. Сундет¹**КОНЦЕПЦИЯ ПОЧВЕННОГО ЗДОРОВЬЯ И СОВРЕМЕННЫЕ ИНДИКАТОРЫ
ЗДОРОВЬЯ ПОЧВ**

¹Казахский научно-исследовательский институт почвоведения и агрохимии
имени У.У. Успанова, 050060, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 75В, Казахстан,

*e-mail: wberel@gmail.com, tsundetovaa@gmail.com

Аннотация. В обзоре обсуждается микробиологический аспект концепции здоровья почвы. Концепция «Здоровье почв» является неотъемлемой частью концепции «Единое здоровье». В 2004 году на конференции «Единый мир, единое здоровье», были подчеркнуты связи между людьми, животными и окружающей средой в динамике болезней. В работе описаны методы оценки плодородия почвы по интегральным и отдельным показателям здоровья почвы и соответствующие шкалы оценки. Рассмотрены и описаны современные, апробированные тесты здоровья почвы. Приведены технические регламенты для стандартизации показателей здоровья почв.

Ключевые слова: единое здоровье, здоровье почвы, индикаторы здоровья почвы, микробиологические тесты здоровья почвы.

Здоровье почвы стало популярной темой в течение последних двух-трех десятилетий, однако самые ранние упоминания о здоровье почвы на самом деле датируются более чем 100-летней давностью.

В 2004 г. WCS (Общество охраны дикой природы, США) провело конференцию «Единый мир, единое здоровье» в ходе работы, которой были подчеркнуты связи между людьми, животными и окружающей средой в динамике болезней. И уже в 2007 г. подход «Единое здравоохранение» был рекомендован в США для планирования мероприятий по борьбе с глобальными вспышками заболеваний. Так вошло в научный обиход и в практику концепция One Health.

ФАО всемерно содействует применению подхода «Единое здоровье» в рамках преобразования агропродовольственной системы в интересах здоровья людей, животных, растений и окружающей среды. Основной задачей ФАО в рамках данной концепции является повышение устойчивости и способности к

восстановлению сельскохозяйственных систем, обеспечение безопасности пищевых продуктов и здорового питания, предотвращение трансграничных болезней, зоонозов и борьбу с ними [1].

С этой стороны концепция «Здоровье почвы - *Soil Health*» является неотъемлемой частью концепции *One Health*, хотя она возникла немного ранее в 90-е годы XX столетия [2].

Появление обсуждаемой концепции означает смену парадигмы в сознании почвоведов, аграриев ученых и практиков: пришло понимание, что физико-химические компоненты качества почвы важны только с точки зрения их влияния на проявление свойств биологической сути почвы. Биологическая активность почвы является ключевым показателем здоровья почвы благодаря интеграции того, как почвенные микроорганизмы реагируют на окружающую среду. Человечество зависит от упорядоченного функционирования почвы, управляемого населяющими ее почвенными организмами [3].

В последние годы наблюдается

лавинообразный рост научных публикаций по данной теме, поэтому хотелось бы прояснить ряд моментов концепции и измерения здоровья почвы.

Здоровые почвы (ЗП) обеспечивают регулирование и поддержку функций экосистемы, таких как круговорот питательных веществ, инфильтрация и удержание воды, газообмен, борьба с вредителями и болезнями, биоразнообразие и накопление углерода, многие из которых оказывают сильное влияние на продуктивность сельского хозяйства. Состояние почвы оценивается с помощью набора показателей, которые охватывают физические, химические и биологические свойства почвы. *Подходящий индикатор должен иметь сильную связь с целевой функцией почвы, быть чувствительным на изменения почвы, воспроизводимый и относительно недорогой для анализа.*

Состояние здоровья почвы в основном определяется разнообразием, структурой и функциями почвообитающих организмов, главным образом, микроорганизмов, поддерживающих ее экологический статус. Посредством количественной оценки состояния здоровья почвы можно объективно оценивать ее реальную биопродуктивность. Как биологическая категория здоровье почвы отражает динамическое состояние активности биологического компонента в органоминеральном комплексе почвы. Тесты здоровья почвы должны быть стандартизированы, замеряться в динамике и определяться инструментально.

Примером такого теста может быть показатель ее фитотоксичности (Гост Исо №220030-2009) [4].

Тесты «Здоровье почвы» позволяют увеличить эффективность использования удобрений за счет точного определения доступных питательных веществ и соответствующие нормы применения удобрений, что в итоге может принести пользу окружающей среде за

счет снижения потерь питательных веществ в атмосферу и природные воды.

Хорошо апробированными и информативными тестами ЗП в постоянно расширяющемся ассортименте тестов Solvita, являются «дыхание почвы», легкодоступный углерод и азот. На основании этих тестов можно судить о доступном для растений углероде и азоте в почве. Предлагается шкала плодородия на основе формулы:

$$\text{Кол-во } \text{CO}_2/10 + \text{ВЭОС}/100 + \text{ВЭОН}/100 = (\text{пример}) 87,6/10 + 222/100 + 26,7/100 = 8,76 + 2,22 + 2,67 = 13,7.$$

Где ВЭО – водноэкстрагируемый соответственно углерод и азот.

Шкала от 0 до 50. Хорошая почва должна иметь более 7 баллов. Значения показателей даны в ppm.

Ward Laboratories Inc. в своем руководстве предлагает шкалу здоровья почвы на основе теста «дыхание почвы» (таблица 1) [5].

Чем больше CO_2 производит почва, тем больше в ней жизни или тем выше микробная биомасса. Показатель отражает потенциал микробной активности почвы. Считается сильным показателем биологической активности почв.

Показатели дыхания почвы могут колебаться от почти нуля до 1000 частей на миллион CO_2 -С. Почва с очень низким баллом может проявлять симптомы медленного распада растительных остатков. С другой стороны, остатки могут очень быстро разлагаться в почве с высоким баллом.

Российский разработчик показателей ЗП Семенов А.М. с соавт. [6] на основе экспериментальных исследований предлагает иной безразмерный параметр определения ЗП, основанный на отклике почвенного микробоценоза в виде выделения углекислого газа на стрессовое воздействие. Ими было установлено, что любое напряжение на образцы грунта вызывает появление динамических волн на зависимости откли-

ка от времени. В случае отсутствия клика постоянно с учетом корректности нагрузки на образцы почвы значение от- его определения.

Таблица 1 - Ранжирование почвы по интенсивности дыхания почвы

CO ₂ -C в ppm	Ранг	Что это подразумевает
0-10	Очень низкий	Очень небольшой потенциал для микробной активности; медленное питательное вещество циклирование и разложение остатков; высокоуглеродистый остаток может длиться > 2-3 лет с ограниченным увлажнением; почти нет N. Дополнительный N может потребоваться из-за микробной иммобилизации.
11-20	Низкий	Минимальный потенциал круговорота питательных веществ; управление остатками все еще может быть проблемой; Очень мало или вообще нет кредита N
21-30	Ниже среднего	Некоторый потенциал круговорота питательных веществ; управление пожнивными остатками все еще может быть проблемой при длительном использовании культур с высоким содержанием углерода; Дан небольшой кредит N
31-50	Чуть ниже среднего	Потенциал микробной активности от низкого до умеренного; Некоторый N кредит может быть предоставлен
51-70	Чуть выше среднего	Умеренный потенциал для микробной активности; Умеренный N кредит может быть дан; Возможно, удастся начать сокращать применение некоторых азотных удобрений.
71-100	Выше среднего	Хороший потенциал для микробной активности; Умеренный кредит азота может быть предоставлен в зависимости от размера пула органического азота; Обычно может снизить норму внесения N
101-200	Высокий	Высокий потенциал микробной активности; может потребоваться больше углерода для поддержания микробной биомассы; может быть предоставлен средний или высокий кредит азота из доступных пулов органического азота; Сокращение азотных удобрений может быть значительным
>200	Очень высокий	От высокого до очень высокого потенциала микробной активности; разложение остатков может длиться <1 года; сохранение почвы покрытый может быть проблемой в некоторых системах; высокий потенциал минерализации азота и запасы азота из могут быть предоставлены имеющиеся пулы органического азота; азотное удобрение сокращение может быть существенным

Сбалансированная биоразнообразием микроорганизмов, это и есть здоровая почва, она может активно бороться различными стрессами, воздействующими на нее, так что, сравнивая амплитуды максимальных пиков на зависимости отклика от времени у контрольного и исследуемых образцов информативно. Превышение или отсутствие максимальной пиковой амплитуды в тестовом образце по сравнению с амплитудой

пика здорового контроля, указывает на то, что почва в образцах нездоровая.

Шкала здоровья учитывает, как вклад амплитуды, так и вклад t в параметр здоровья. Одновременно сравнивают ширину амплитуды пика на половине его высоты в исследуемом образце и контрольном образце, считаемого здоровым, на графике отклика в зависимости от времени:

$$ЗП = |(L_{kp} - L_{ip}):L_{kp}|,$$

где L_{kp} – ширина на полувысоте пика контрольного образца почвы, L_{ip} – ширина на полувысоте пика исследуемого образца почвы.

Исследуемый образец считается наиболее здоровым, если он мало отличается от нуля – значение модуля дроби, в числителе – разность ширины максимального по амплитуде пика на его полувысоте у контрольного и исследуемого образцов, знаменатель равен ширине пика на его полувысоте у контроля. Поэтому можно получить очень информативную безразмерную информацию о параметрах, свидетельствующих о состоянии почвы.

Скорость выделения образцами углекислого газа целесообразно определять при такой же температуре, что и было при термостатировании образцов. CO_2 можно определять и другими удобными способами.

Замеры скорости выделения CO_2 можно проводить с различной частотой при построении графической зависимости скорости выделения CO_2 образцами, к примеру, можно замерить через час, но не реже одного раза в сутки. Доказано, что для получения четкой и полной кинетической кривой замеры V нужно проводить в течение 4-9 суток.

Шкала здоровья почвы:

в интервале от 0 до 0,1 – образец считается здоровым;

превышает 0,1, но меньше 0,2 – образец считается практически здоровым;

превышает 0,2, но меньше 0,4 – образец считается умеренно нездоровым;

при больших значениях параметра здоровья почвы – образец считается нездоровым.

Ученые Вашингтонского университета изучая электродвижущую силу электродов в здоровой и нездоровой почве обнаружили большее значение тока в здоровой почве. При этом на

электродах в здоровой почве образовывалась биопленка микроорганизмов, которая отсутствовала на электродах нездоровой почвы. 40-80 % микроорганизмов в почве организованы в виде биопленок. Полимеры биопленок поддерживают перенос электронов в почве. Наличие микробов, способных к внеклеточному переносу электронов может быть использовано в качестве рабочего принципа электрохимического датчика для контроля состояния почвы. Так как здоровая почва может поддерживать метаболизм почвенных микробов с более высокой скоростью по сравнению с нездоровыми почвами, ожидается, что более высокий ток будет наблюдаться в электродах, развернутых в реакторах со здоровым грунтом. Таким образом, предложен тест непрямого исследования активности почвенного микробиома на основе их электрохимической активности. На рисунке 1 из статьи показаны измерения силы тока во времени в здоровой почве (А) и нездоровой почве (В) [7].

Группа французских и тайландских ученых разработали 12 протоколов определения параметров ЗП под общим названием Biofunctool® в соответствии с критериями взаимосвязи физико-химических параметров почв с биологическими, не нарушающего воздействия на почвы при тестовых определениях, дешевизны и краткосрочности анализов.

Первые 4 протокола включали показатели стабильности почвенных агрегатов, фильтруемость и визуальная оценка почвенной структуры, вторая группа оценивала доступность нитратов и аммония и последняя группа из 6 протоколов оценивала трансформацию углерода по тестам активности дождевых червей, мезофауны, микробной активности, базального «дыхания почв» и легкоокисляемого углерода. На основании результатов исследований был сделан вывод, что Biofunctool® дает не абсолютную оценку качества почвы, а скорее сравнительную оценку в заданном

контексте. Тем не менее, педоклиматический эффект может быть дополнительно интегрирован в результаты, обеспечивающие проведение ковариативного анализа (т.е. интегрирование гранулометрического состава почвы, влажности почвы, среднегодового количества осадков, температуры и т. д.). На основе методов многопараметрической статистики, которые позволяют приписывать объективный вес каждому показателю, авторы предлагают разработать итоговый индекс здоровья почвы [8].

Американские исследователи изучали связи между активностью четырех почвенных ферментов (β -глюкозидаза [BG], N-ацетил- β -глюкозаминидаза [NAG], арилсульфатаза [AST] и фосфомоноэстераза [PME]) и свойствами почвы, средней урожайностью на двух долгосрочных (14 и 36 лет) сельскохозяйственных участках в засушливых районах на севере Великих равнин, США. Обработки были беспашотными и пропашными севооборотами с яровой пшеницей (*Triticum aestivum* L.), ячменем (*Hordeum vulgare* L.), горохом (*Pisum sativum* L.) и под паром с азотным удобрением и без него. Образцы почвы, взятые перед сельскохозяйственными операциями в апреле 2019 года, были проанализированы на физические, химические, биологические, определяли биохимические свойства и среднюю урожайность. Компонентный анализ показал, что β -глюкозидаза была связана с большинством физических, химических, биологических и биохимических свойств, за ним следуют NAG и PME на двух участках. С ферментами β -глюкозидазой и N-ацетил- β -глюкозаминидазой обнаружена тесная связь с урожаем сельхозкультур. Таким образом, результаты исследования позволяют предположить, что активность BG и NAG могут рассматриваться как потенциальные индикаторы здоровья почвы из-за их большой связи со свойствами почвы и в значительном отношении со средней урожайностью

сельскохозяйственных культур по годам в сравнении с ПМЭ и АСТ. Поскольку BG является ферментом С-цикла, а NAG является ферментом N-цикла, то их высокая активность указывают на повышенную микробную активность, которая приводит к увеличению С секвестрации и доступности азота, которые важны для улучшения здоровья и плодородия почвы, а также для выращивания сельскохозяйственных культур [9].

Для оценки качества почвы используются ее свойства, выраженные через соответствующие индексы.

Предлагаются интегрированные индексы качества почвы SQI. Комплексные показатели качества почвы на основе по совокупности свойств почвы обеспечивают лучшее отражение качеств почвы, чем ее отдельные параметры.

Показатели качества почвы SQI можно измерить в три шага:

1. определение минимального набора данных МДС (показателей качества) для исследуемой почвы;
2. преобразование значений индикатора в унифицированный балл индикатора;
3. интеграция баллов в комплексный показатель SQI.

Преобразование значений индикатора выполняется за счет статистических методов, таких как метод главных компонент (РСА), множественная корреляция, кластерный анализ, факторный анализ, радиальная диаграмма [10].

Для преобразования значений индикатора в баллы, необходимо установить допустимые пределы для каждого показателя. Оптимальные значения могут быть получены из почв ненарушенных экосистем, где почва функционирует на максимальном уровне. Выбранные индикаторы могут быть преобразованы в соответствии с линейным или нелинейным правилом подсчета баллов. Линейная функция подсчета очков:

$$Y = x - c/t - s \quad (1)$$

$$Y = 1 - [x - c/t - s] \quad (2),$$

где Y - линейная оценка балла, x - значение свойства почвы, а s и t - нижнее и верхнее пороговые значения.

Уравнение (1) используется для функции балла «больше есть лучше», уравнение (2) для «меньше есть лучше», а их комбинация для «оптимальной» функции подсчета баллов. Если рассчитанный балл > 1.0 , то это принимается за 1.00 балл.

Нелинейная функция оценки:

$$NLSF(Y) = \frac{1}{1 + e^{-b(x-A)}} \quad (3),$$

где x - значение свойства почвы, A - базовая линия или значение свойства почвы, когда балл равен 0,5, а b - наклон.

Используя уравнение, можно получить три типа стандартизированной оценки:

(1) «больше есть лучше», (2) «меньше есть лучше» и (3) «оптимальный».

Есть несколько способов интеграции индикаторов для получения общего SQI. Самый простой метод — это суммирование всех показателей индикаторов. Другой способ это взвешенные индексы, где каждый индикатор получает весовой коэффициент в зависимости от его важности и общего вклада в качество почвы. Пример SQI уравнение:

Soil quality index (SQI):

$$= q_{we} + q_{wms} (wt) + q_{rsd} (wt) + q_{rbd} (wt) + q_{pns} (wt) \quad (4),$$

где q_{we} - это оценка способности почвы фильтровать воду, q_{wm} свойство облегчать движение и удерживать воду, q_{rsd} , способность противостоять поверхностной эрозии, q_{pns} показатель питания растений, q_{scp} - поддержание продуктивности сельскохозяйственных культур и wt это взвешенное числовое значение для каждой функции почвы [11].

Микроорганизмы являются важными компонентами почвы и экосистем. Они активно участвуют в кругово-

роте питательных веществ, разложении органических веществ и защите растений от вредных химических веществ, попадающих в почву. Однако для чтобы микроорганизмы функционировали, необходимо присутствие органических веществ в почве для обеспечения бактерий и микромикетов источником энергии и органического углерода. Увеличение или уменьшение органического вещества приводит к увеличению или уменьшению микробного разнообразия. Сокращение микробного разнообразия снижает способность почвы нормально функционировать и обычно и снижает устойчивость почвы к серьезным изменениям окружающей среды, таких как эрозия. Таким образом, при измерении качества почвы физические, химические и биологические показатели имеют большое значение. Однако наиболее важными являются биологические индикаторы [12].

Почвенный микробный метаболический коэффициент (qCO_2) является важным индикатором состояния почвы. Почвенная микробная биомасса является компонентом органического вещества почвы, состоящее из различных микроорганизмов микронных размеров. Между органическим веществом и активностью почвенных микроорганизмов существует тесная связь. Поскольку микроорганизмы влияют на рост и развитие сельскохозяйственных культур, то органические вещества в почве могут способствовать активности микробов и повышать плодородие почвы. При этом на углерод микробной биомассы приходится 1-3 % от общего углерода почвы, а на азот микробной биомассы приходится 5 % от общего азота почвы. qCO_2 определяется как дыхание почвы на единицу углерода почвенной микробной биомассы в единицу времени ($CO_2 / \text{УМБП}$), выраженное в $\text{мг } CO_2 - \text{C } g^{-1} \text{УМБ } ч^{-1}$, отражающее эффективность преобразования органического углерода в микробную биомассу

почвенными микроорганизмами. Его значения демонстрируют состояние накопления или выноса углерода из почвы. Здоровый диапазон значений qCO_2 для сельскохозяйственных почв составляет от 0,5 до 2,0 мг CO_2-C г⁻¹ УМБ ч⁻¹ (Janssens et al. 2010). Зрелые почвы с значения qCO_2 выше 2,0 мг CO_2-C г⁻¹ УМБ ч⁻¹ следует рассматривать как нездоровую скорость микробного дыхания почвы. Высокие значения qCO_2 отражают выбросы CO_2 выше, чем потребность в поддержании микробных популяций, что снижает способность почвы улавливать C. Значения ниже 0,5 мг CO_2-C г⁻¹ УМБ ч⁻¹ указывают на преимущественно спящие микробные сообщества, которые не участвуют в круговороте питательных веществ или секвестрации углерода. Среднее глобальное значение qCO_2 составляла 1,8 мг CO_2-C г⁻¹ УМБ ч⁻¹ в сельскохозяйственных и природных экосистемах. При том, что критическое значение для сельскохозяйственных почв составляет 1,83 мг CO_2-C г⁻¹ УМБ ч⁻¹. В настоящее время значение qCO_2 на пахотных землях примерно вдвое больше, чем в естественных экосистемах [13].

Применение растительных остатков и биоугля улучшило биологические и химические свойства почвы в агроэкосистемах. Было изучено влияние остатков конопли (HR), биоугля из конопли (HB) и биоугля из твердой древесины (HA) на пять гидролитических ферментов, структуру сообщества почвенных микробных фосфолипидов (PLFA), pH, перманганат окисляемого углерода (POXC) почвенный органический углерод (SOC) и общего азота (TN) на двух почвах Пьемонта и Прибрежной равнины Северной Каролины при 30-дневном цикле влажности, поддерживаемом при 60% заполнении водой порового пространства, с последующим 7-дневным чередующимся циклом «сухой-влажный» в течение 42 дней или на уровне 60% в течение 42 дней при аэробной инкуба-

ции в лаборатории. Результаты показали, что HR и HB значительно увеличили среднее геометрическое ферментативной активности в 1-2 раза в почве Пьемонта при трех циклах увлажнения и примерно в 1,5 раза ниже в прибрежной почве. Сдвиг в структуре микробного сообщества был отчетливым в прибрежной почве в сравнении с почвой Пьемонта. При чередующимся цикле увлажнения HR и HB значительно увеличивали POXC (600 - 700 мг POXC/кг почвы) в прибрежной почве в сравнении с почвой Пьемонта. В целом результаты показывают, что, в отличие от HA, HR и HB благотворно повлияет на здоровье и продуктивность почвы, поэтому потенциально улучшает устойчивость почвы к изменению климата [14].

Шведские исследователи изучали влияние управления почвой на показатели здоровья почвы в полевых условиях в 20 фермерских хозяйствах на юге Швеции. Контролем послужили необрабатываемые земли, представляющие потенциальное здоровье почвы. Состояние почвы оценивали количественно путем измерения физических и биологических показателей почвы: стабильность влажных агрегатов, автоклавно-цитратно-извлекаемый почвенный белок, органическое вещество, активный углерод и гетеротрофное дыхание почвы на основе протокола КОСП (Комплексная оценка состояния почвы – Comprehensive Assessment of Soil Health (CASH) [15]. Также измеряли текстуру и pH. Индекс управления почвой был рассчитан для каждого поля на основе урожая, разнообразия, обработки почвы и внесения органических удобрений путем нормализации и аддитивной агрегации индексов:

$$SMI_I = \sum \frac{1}{3} \left(\frac{CDI_i}{CDI_{max}} + \frac{YSDI_i}{YSDI_{max}} + \frac{OAI_i}{OAI_{max}} \right) \quad (5),$$

Уравнение количественно отражает разнообразие культур в севообороте,

частоту механического нарушения почвы (обработка почвы) и количество внесений органических удобрений.

Для оценки общего состояния почвы отобранных полей был рассчитан относительный индекс здоровья почвы (RSH). Для каждого участка значения индикатора здоровья почвы в поле были разделены на соответствующие значение для контрольной почвы. Затем RSH был получен путем суммирования отношений индикаторов с использованием разного веса. Значение RSH, равное 5, указывает на то, что здоровье почвы обрабатываемого поля находится на уровне здоровья контрольной почвы, в то время как низкое значение RSH указывает на плохое состояние полевой почвы относительно

$$RSH_I = \left(\frac{WAS_{if}}{WAS_{iu}} + \frac{Prot_{if}}{Prot_{iu}} + \frac{Act_{if}}{Act_{iu}} + \frac{Resp_{if}}{Resp_{iu}} + \frac{SOM_{if}}{SOM_{iu}} \right)$$

потенциального здоровья почвы.

(6),

где WAS - стабильность агрегатов во влажном состоянии. Prot - автоклавно-цитратно-экстрагируемый белок является индикатором органически связанного азота, который легко минерализуется микробами. Содержание органического вещества почвы (SOM) анализируют

по потере массы на воспламенение при 500°C в течение двух часов. Активный углерод (ActC) является мерой легко окисляемого органического вещества. Гетеротрофное почвенное дыхание (Resp) является мерой метаболической активности микробного сообщества.

Установлено, что при высоком индексе управления, т.е. большее разнообразие культур, меньше операций по обработке почвы и больше органических удобрений, поля показали лучшее здоровье почвы с более высокими уровнями агрегатной стабильности, белка, активного углерода, дыхания и органического вещества. Однако, состояние почвы сельскохозяйственных полей в целом было хуже по сравнению с контрольной почвой [16].

Согласно документу Министерства сельского хозяйства США - USDA (2019) Soil Health Technical Note No. 450-03 Recommended Soil Health Indicators and Associated Laboratory Procedures, в список рекомендуемых тестов здоровья почвы включены следующие тесты (таблица 2). Цель документа использовать стандартные процедуры для оценки здоровья почв в полевых и вегетационных опытах.

Таблица 2 - Рекомендуемые индикаторы и методы

Почвенный процесс	Индикаторы почвенного	Методы	Ссылки
1	2	3	4
Цикл органического вещества и секвестрация углерода	Содержание почвенного углерода (СПУ – SOC)	Сухое сжигание	Рекомендуемый метод. Nelson, D. W. and Sommers L. E. (1996) Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter. In: Sparks, D. L., et. al., Eds., Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods, SSSA Book Series No. 5, SSSA and ASA. Madison, WI, 961-1010.
		Мокрое окисление	Дает показатели, сравнимые с сухим сжиганием, но приводит к образованию химических отходов и является более трудоемким.

Продолжение таблицы №2

	Потеря массы	Потери при воспламенении (LOI)	Наиболее часто используется коммерческими лабораториями. Используется в комплексной оценке состояния почвы (CASH).
Структурная стабильность почвы (Инфильтрация)	Агрегация	ARS макроагрегатная стабильность во влажном состоянии	Рекомендуемый метод. Kemper, W. D. and Rosenau, R. C. (1986) Aggregate stability and size distribution. In: Klute, A. Ed, Methods of Soil analysis. Part 1. Agronomy Monograph 9. 2 nd ed., Madison, Wisconsin, 425-442. Впоследствии опубликованный John R, Nimmo, Kim S. Perkins Aggregate stability and size distribution (2002).
		NRCS влажная агрегация	Основан Kemper, W. D. and Rosenau, R. C. (1986) Aggregate stability and size distribution. In: Klute, A. Ed., Methods of soil analysis. Part 1. Agronomy Monograph 9. 2 nd ed., Madison, Wisconsin. 425-442, этот метод предварительно смачивает образцы (Soil Survey Staff 2014, стр. 213-216).
		Опрыскивание инфильтрометром Корнелла	Schindelbeck, R. R., B. N. Moebius-Clune, D. J. Moebius-Clune, K. S. Kurtz, and H. M. van Es, 2016. Cornell Soil Health Laboratory: Comprehensive assessment of soil health standard operating procedures. Cornell University, Geneva, NY.
Общая микробная активность	Кратковременная минерализация углерода. (STCM, он же дыхание)	Вдыхание углекислого газа (CO ₂), инкубация 4 дня	Рекомендуемый метод. Schindelbeck, R. R., B. N. Moebius-Clune, D. J. Moebius-Clune, K. S. Kurtz, and H. M. van Es, 2016. Cornell Soil Health Laboratory: Comprehensive assessment of soil health standard operating procedures. Cornell University, Geneva, NY. 4-дневная инкубация в почве (CO ₂ измеряется с помощью электропроводности, газовой хроматографии или титрования).
		Дыхание CO ₂ , инкубация 24 часа	Как и предыдущий метод, но с коротким периодом инкубации, например, Haney, R. L., Brinton, W. H., Evans, E. (2008). Estimating soil carbon, nitrogen, and phosphorus mineralization from short-term carbon dioxide respiration. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 39 (17-18), 2706-2720, Solvita или другие 24-часовые методы.

Продолжение таблицы №2

1	2	3	4
Общая микробная активность	Активность фермента (АФ)	β -глюкозидаза [BG]	Рекомендуемый метод. Eivazi, F. and Tabatabai, M. A. (1988). Glucosidases and Galactosidases in Soils. Soil Biology and Biochemistry, 20, 601-606. Представленные S Deng, I Popova. Methods of soil enzymology 9, 185-209 (2011). Участвует в цикле C.
		N-ацетил- β -глюкозаминидаза [NAG]	Рекомендуемый метод. Parham and Deng (2000), Detection, quantification and characterization of beta-glucosaminidase activity in soil. - Soil Biology & Biochemistry 32, 1183-1190 представленный S Deng, I Popova Methods of Soil Enzymology 9, 185-209 (2011).
		Фосфомоноэстераза [PME] (кислотная/щелочная фосфотаза; Pase)	Рекомендуемый метод. Eivazi F, Tabatabai MA (1977). Phosphates in soils. Soil Biol. Biochem.9:167-172.), представленный Acosta-Martínez, V., and M.A. Tabatabai. 2011. Phosphorus cycle enzymes. p. 161-183.
		Арилсульфатаза [AST]	Рекомендуемый метод. Tabatabai, M. A. and Bremner, J. M. (1970). Factors Affecting Soil Arylsulfatase Activity. Soil Science Society of America Journal, 34, 427-429. Представленный Klose et.al. (2011).
Источник углеродной пищи	Легкодоступный углерод	Перманганат окисляемый углерод	Рекомендуемый метод. Weit et.al., 2003 R. R. Weil, K. R. Islam, M. Ф. Stine, J. B. Gruver, S. E. Samson-Liebig. Estimating active carbon for soil quality assessment: a simplified methods for laboratory and field use.
		Твердые частицы органического вещества	Фракция определяется операционно, с использованием множества методов.
		28-дневная минерализация C	Слишком длителен для использования в лаборатории с высокой производительностью.

Продолжение таблицы №2

1	2	3	4
		Экстрагируемый холодной/ горячей водой органический С (WEOC)	Холодный WEOC (Haney, R. L., Brinton, W. H., Evans, E. (2008). Estimating soil carbon, nitrogen, and phosphorus mineralization from short-term carbon dioxide respiration. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 39(17-18), 2706-2720). Горячий WEOC (Ghani A., Dexter M., Perrott K. W. 2003. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilization, grazing and cultivation. Soil Biology and Biochemistry 35(9): 1231-1243.
		Растворимые углеводы	Стандартные методы, которые больше широко не используется.
		Субстрат индуцированное дыхание	Метод исследования; трудоемкий в лаборатории.
		Микробная биомасса (фумигация-инкубация, фумигация-экстракция)	Jenkinson D. S. Advances in nitrogen cycling in agriculture ecosystems. CAB International, Wallingford, UK, 1988, pp. 368-386.
Биодоступный азот	Доступный органический пул N	Содержание белка экстрагируемого цитратом при автоклавировании	Рекомендуемый метод. Schindelbeck, R. R., B. N. Moebius-Clune, D. J. Moebius-Clune, K. S. Kurtz, and H. M. van Es. 2016. Cornell Soil Health Laboratory: Comprehensive assessment of soil health standard operating procedures. Cornell University, Geneva, NY.
		Экстрагируемый холодной водой N (WEON)	Soil Health Nutrient Tool (Haney, R. L., Brinton, W. H., Evans, E. (2008). Estimating soil carbon, nitrogen, and phosphorus mineralization from short-term carbon dioxide respiration. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 39(17-18), 2706-2720.
		Корреляция с кратковременной минерализацией С	J. M. Picone, A. E. Hedin, D. P. Drob, A. C. Aikin. (2002). NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues.
		7-дневный анаэробный потенциально минерализуемый N	Drinkwater, L. E., Cambardella, C. A., Reeder, J. D., Rice, C. W., 1996. Potentially mineralizable nitrogen as an indicator of biologically active soil nitrogen. In: Doran, J. W., Jones, A. J. (Eds), Methods for Assessing Soil Quality. Soil Science Society of America, Special Publication 49, Madison, WI, pp. 217-229.

Продолжение таблицы №2

1	2	3	4
Микробное разнообразие	Структура сообщества	Фосфолипидные жирные кислоты (PLFA)	Рекомендуемый метод. PLFA (Buyer and Sassre 2012. High throughput fatty acid analysis of soils pp. 127-130).
		Профиль сложноэфирно-связанного метилового эфира жирной кислоты (EL-FAME)	EL-FAME – более новый и менее дорогой метод, который дает результаты соответствующие методу PLFA.
		«Выборка на всю жизнь»	Рекомендуется. Если доступны соответствующие криогенные хранилища, мы рекомендуем архивировать образцы до тех пор, пока не будут доступны новые методы. Если выбраны эти методы, пробы почв следует брать в асептических условиях.

Таким образом, тема здоровья почвы является широко обсуждаемой в мировой агрономической науке, уже имеются несколько коммерческих и научных подходов по оценке почвенного здоровья в виде наборов тестов или отдельных тестов с их интегральной оценкой и выходом на производственный уровень.

Американские ученые предлагают программу исследования показателей здоровья почвы в рамках континента для отбора наиболее информативных тестов в разных системах землепользования [17].

Канадские и австралийские ученые будущие возможности для улучшения оценки состояния почвы видят в разработке датчиков на месте, которые могут обеспечить эффективную оценку биотических и абиотических показателей, таких как доступный углерод в почве, объемная плотность почвы, pH, влагоемкость почвы и микробная активность почвы. Авторы полагают, что эти методы и приемы значительно улучшат оценку состояния почвы и наши воз-

можности по устойчивой оптимизации здоровья и качества почвы. Глобальные достижения в области биологии почвы, новые ИТ-технологии и методы анализа метаданных для интерпретации и обобщения данных индикаторов состояния почвы в различных условиях окружающей среды приведут к более надежному и устойчивому управлению земельными ресурсами, что поможет смягчить и предотвратить глобальную деградацию почвы [18].

Метагеномный анализ почвы открывает большие перспективы в оценке ЗП. Фактически он является ее функциональным профилем, составленным на основе генетической информации. Помимо информации о разнообразии функциональных генов, анализ метабенома позволяет оценивать структуру почвенных сообществ всей биоты, оценить основные метаболические пути. В почвенно-экологических исследованиях метагеномный анализ способен выявлять тренды распределения генов при изменении условий среды [19].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 «Единое здоровье» [Электронный ресурс]. Режим доступа к сайту: <https://www.fao.org/one-health/ru/>, свободный.
- 2 Doran, J. W. & Parkin, T. B. in *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment* Vol. 32// (eds Doran, J. W., Coleman, D. C., Bezdicek, D. F. & Stewart, B. A.). Soil Science Society of America. - 1994. С. 1–21.
- 3 *Principles and Applications of Soil Microbiology (Third Edition)*// 14-Applied aspects of soil carbon. - 2021. - P. 363-384.
- 4 Семенов А.М., Спиридонов Ю.Я., Торопова Е.Ю., Глинушкин А.П. Здоровая почва – условие устойчивости и развития агро- и социосфер (проблемно-аналитический обзор)// *Известия РАН. Серия биологическая*. – 2020. - №1. - С.12–21.
- 5 [Электронный ресурс]. Режим доступа к сайту: *Haney Test Interpretation Guide v1.0* Ward Laboratories Inc. Доступно на *Haney-Rev-1.0-Interpretation-Guide.pdf* (wardlab.com), свободный.
- 6 Пат. RU 2408885. Семенов А.М., Бубнов И. А., Ван Бругген А.Х.К. Семенова Е.В. / Способ определения параметра здоровья у образцов почвы, компостов и других твердых субстратов/ от 10.01.2011.
- 7 Mohamed, Abdelrhman & Sanchez, Eduardo & Sanchez, Natalie & Friesen, Maren & Beyenal, Haluk. (2021)// *Electrochemically Active Biofilms as an Indicator of Soil Health*. *Journal of The Electrochemical Society*. – 2021. – P. 168.
- 8 Alexis Thoumazeau, Cécile Bessou, Marie-Sophie Renevier, Jean Trap, Raphaël Marichal, Louis Mareschal, Thibaud Decaëns, Nicolas Bottinelli, Benoît Jaillard, Tiphaine Chevallier, Nopmanee Suvannang, Kannika Sajjaphan, Philippe Thaler, Frédéric Gay, Alain Brauman. *Biofunctool®: a new framework to assess the impact of land management on soil quality. Part A: concept and validation of the set of indicators*// *Ecological Indicators*. – 2019. – Vol. 97. – P. 100-110.
- 9 Upendra M.S., Liptzin D., Dangi M.S. Enzyme activities as soil health indicators in relation to soil characteristics and crop production// *Agrosystems, Geosciences & Environment*. – 2022. – P. 5.
- 10 Doran J. W., Parkin T. B. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set // *Methods for assessing soil quality*. – 1997. – T. 49. – С. 25-37.
- 11 Цит. по Mukhopadhyay S., Masto R.E., Tripathi R.C., Srivastava N.K. Application of Soil Quality Indicators for the Phytoremediation of Mine Spoil Dumps// *In Phytomanagement of Polluted Sites: Market Opportunities in Sustainable Phytoremediation*. 1st Edition – Ed.: Vimal Chandra Pandey, Kuldeep Bauddh. – 2018. – P. 361-388.
- 12 Sholeye A.R., Ojuederie O.B., Babalola O.O. Soil Quality Indicators; Their Correlation and Role in Enhancing Agricultural Productivity// *Food Security and Safety*. – 2022. - P. 271-285.
- 13 Ashraf M.N., Waqas M. A., Rahman S. Microbial Metabolic Quotient is a Dynamic Indicator of Soil Health: Trends, Implications and Perspectives (Review)// *Eurasian Soil Science*. - Vol. 55. - № 12. - P. 202.
- 14 Atoloye IA, Adesina IS, Sharma H, Subedi K, Liang C-L, Shahbazi A, et al. Hemp biochar impacts on selected biological soil health indicators across different soil types and moisture cycles// *PLoS ONE*. – 2022. – Vol.17(2).
- 15 Schindelbeck, R.R., Moebius, B.N., Moebius-Clune, D.J., Kurtz, K., Van Es, H. Cornell University Comprehensive Assessment of Soil Health Laboratory Standard Operating Procedures. – 2016. - P 12.

16 Williams H., Colombi T., Keller T. The influence of soil management on soil health: An on-farm study in southern Sweden// *Geoderma*. - 2020. – P. 360.

17 Norris C.E., Bean G.M., Cappellazzi S.B., Cope M., Greub K.L. H., Liptzin D., Honeycutt, C.W. Introducing the North American project to evaluate soil health measurements// *Agronomy Journal*. - 2020. – P. 21.

18 Tony Yang, Kadambot H.M. Siddique, Kui Liu. Cropping systems in agriculture and their impact on soil health-A review// *Global Ecology and Conservation*. – 2020. – Vol. 23. – 13 p.

19 Семенов М.В. Метабаркодинг и метагеномика в почвенно-экологических исследованиях: успехи, проблемы и возможности// *Журнал общей биологии*. – 2019. – Т. 80, № 6. – С. 403–417.

REFERENCES

1 «One Health» [Electronic resource]. Site access mode: <https://www.fao.org/one-health/ru/,svobodnyj>.

2 Doran, J. W. & Parkin, T. B. in *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment* Vol. 32// (eds Doran, J. W., Coleman, D. C., Bezdicek, D. F. & Stewart, B. A.). Soil Science Society of America. - 1994. P. 1–21.

3 *Principles and Applications of Soil Microbiology (Third Edition)*/ 14-Applied aspects of soil carbon. - 2021. - P. 363-384.

4 Semenov A.M., Spiridonov I.Ya., Toropova E.Iy., Glinyshekin A.P. Zdorovaia pochva – yslovie ystoichivosti i razvitiya argo- i sotsiosfer (problemno-analiticheskii obzor)// *Izvestiya RAN. Seriya biologicheskaya*. – 2020. - №1. - С. 12–21.

5 [Electronic resource]. Site access mode: Haney Test Interpretation Guide v1.0 Ward Laboratories Inc. Dostupno na [Haney-Rev-1.0-Interpretation-Guide.pdf](https://www.ward-lab.com/Haney-Rev-1.0-Interpretation-Guide.pdf) (ward-lab.com),svobodnyj.

6 Pat. RU 2408885. Semenov A.M., Bybnov I. A., Van Bryggen A.H.K. Semenova E.V. Sposob opredeleniya parametra zdorovia y obraztsov pochvy, kompostov i drugih tverdykh sybstratov/ ot 10.01.2011.

7 Mohamed, Abdelrhman & Sanchez, Eduardo & Sanchez, Natalie & Friesen, Maren & Beyenal, Haluk. (2021)// *Electrochemically Active Biofilms as an Indicator of Soil Health*. Journal of The Electrochemical Society. – 2021. – P. 168.

8 Alexis Thoumazeau, Cécile Bessou, Marie-Sophie Renevier, Jean Trap, Raphaël Marichal, Louis Mareschal, Thibaud Decaëns, Nicolas Bottinelli, Benoît Jaillard, Tiphaine Chevallier, Nopmanee Suvannang, Kannika Sajjaphan, Philippe Thaler, Frédéric Gay, Alain Brauman. Biofunctool®: a new framework to assess the impact of land management on soil quality. Part A: concept and validation of the set of indicators// *Ecological Indicators*. – 2019. – Vol. 97. – P. 100-110.

9 Upendra M.S., Liptzin D., Dangi M.S. Enzyme activities as soil health indicators in relation to soil characteristics and crop production// *Agrosystems, Geosciences & Environment*. – 2022. - P.- 5.

10 Doran J. W., Parkin T. B. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set // *Methods for assessing soil quality*. – 1997. – Т. 49. – S. 25-37.

11 Tsit. po Mukhopadhyay S., Masto R.E., Tripathi R.C., Srivastava N.K. Application of Soil Quality Indicators for the Phytoremediation of Mine Spoil Dumps// *In Phytomanagement of Polluted Sites: Market Opportunities in Sustainable Phytoremediation*. 1st Edition – Ed.: Vimal Chandra Pandey, Kuldeep Baudh. – 2018. – P. 361-388.

12 Sholeye A.R., Ojuederie O.B., Babalola O.O. Soil Quality Indicators; Their Correlation and Role in Enhancing Agricultural Productivity// Food Security and Safety. – 2022. – P. 271-285.

13 Ashraf M.N., Waqas M. A., Rahman S. Microbial Metabolic Quotient is a Dynamic Indicator of Soil Health: Trends, Implications and Perspectives (Review)// Eurasian Soil Science. - Vol. 55. - № 12. - P. 202.

14 Atoloye IA, Adesina IS, Sharma H, Subedi K, Liang C-L, Shahbazi A, et al. Hemp biochar impacts on selected biological soil health indicators across different soil types and moisture cycles// PLoS ONE. – 2022. – Vol. 17(2).

15 Schindelbeck, R.R., Moebius, B.N., Moebius-Clune, D.J., Kurtz, K., Van Es, H. Cornell University Comprehensive Assessment of Soil Health Laboratory Standard Operating Procedures. – 2016. – P 12.

16 Williams H., Colombi T., Keller T. The influence of soil management on soil health: An on-farm study in southern Sweden// Geoderma. - 2020. – P. 360.

17 Norris C.E., Bean G.M., Cappellazzi S.B., Cope M., Greub K.L. H., Liptzin D., Honeycutt, C.W. Introducing the North American project to evaluate soil health measurements// Agronomy Journal. - 2020. – R. 21.

18 Tony Yang, Kadambot H.M. Siddique, Kui Liu. Cropping systems in agriculture and their impact on soil health-A review// Global Ecology and Conservation. – 2020. – Vol. 23. – 13 p.

19 Semenov M.V. Metabarcoding i metagenomica v pochvenno-ecologicheskikh issledovaniyah// Zhurnal obshchey biologii. – 2019. – Tom 80. - № 6. – С. 403–417.

ТҮЙІН

А.А. Құрманбаев^{1*}, Т.Р. Сүндет¹

ТОПЫРАҚ ДЕНСАУЛЫҒЫНЫҢ КОНЦЕПЦИЯСЫ ЖӘНЕ ҚАЗІРГІ ТОПЫРАҚ ДЕНСАУЛЫҒЫНЫҢ КӨРСЕТКІШТЕРІ

¹Ө.О.Оспанов атындағы Қазақ топырақтану және агрохимия ғылыми зерттеу институты, Алматы қаласы, әл-Фараби даңғылы, 75 В, Қазақстан,

*e-mail: wberel@gmail.com, tsundetovaa@gmail.com

Шолуда топырақ денсаулығы тұжырымдамасының микробиологиялық аспектісі талқыланады. «Топырақ денсаулығы» тұжырымдамасы «Бір Денсаулық» тұжырымдамасының ажырамас бөлігі болып табылады. 2004 жылы «Бір әлем, Бір Денсаулық» конференциясында ауру динамикасындағы адамдар, жануарлар және қоршаған орта арасындағы байланыстар атап өтілді. Жұмыста топырақ денсаулығының интегралды және жеке көрсеткіштері бойынша топырақ құнарлылығын бағалау әдістері және тиісті бағалау шкалалары сипатталған. Топырақ денсаулығының заманауи, сыналған сынақтары қарастырылып, сипатталған. Топырақ денсаулығының көрсеткіштерін стандарттау үшін техникалық регламенттер келтірілген.

Түйінді сөздер: бірыңғай денсаулық, топырақ денсаулығы, топырақ денсаулығының көрсеткіштері, топырақ денсаулығының микробиологиялық сынақтары

SUMMARY

A.A. Kurmanbayev^{1*}, T.R. Sundet¹

SOIL HEALTH CONCEPT AND MODERN SOIL HEALTH INDICATORS

¹ *Kazakh Research Institute of Soil Science and Agrochemistry named
after U.U. Usmanov, 050060, Almaty, al-Farabi avenue, 75 B, Kazakhstan,
e-mail: wberel@gmail.com, tsundetovaa@gmail.com

The review discusses the microbiological aspect of the concept of soil health. The concept of «Soil health» is an integral part of the concept of «One health». In 2004, at the conference «One World, One Health», the links between people, animals and the environment in the dynamics of diseases were emphasized. The paper describes methods for assessing soil fertility by integral and individual indicators of soil health and the corresponding assessment scales. Modern, proven soil health tests are considered and described. Technical regulations for standardization of soil health indicators are given.

Key words: unified health, soil health, indicators of soil health, microbiological tests of soil health.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

1 Курманбаев Аскар Абылайканович – главный научный сотрудник отдела Плодородия и биологии и почв, д.б.н., профессор, e-mail: *wberel@gmail.com*

2 Сундет Тоғжан Рахматуллақызы – инженер-аналитик отдела Плодородия и биологии и почв, магистр сельскохозяйственных наук,
e-mail: *tsundetovaa@gmail.com*